

—シンポジウム/会合報告—
Symposium/Meeting Report

「南極プレートの構造と進化に関する国際ワークショップ (SEAP2003)」報告

金尾政紀¹・澁谷和雄¹・小林励司²

Report on Workshop “Structure and Evolution of the Antarctic Plate 2003 (SEAP2003)”

Masaki Kanao¹, Kazuo Shibuya¹ and Reiji Kobayashi²

(2003 年 9 月 2 日受付; 2003 年 11 月 18 日受理)

Abstract: A workshop on “Structure and Evolution of the Antarctic Plate 2003 (SEAP2003)” was held on March 03–05, 2003 at Boulder, Colorado, USA, with 97 participants. The purpose of this workshop was to develop a long-term science plan to improve understanding of the structure and evolution of the Antarctic Plate. In particular, the scientific justification and feasibility of the program to improve seismic instrumentation on and around the Antarctic continent was a centerpiece of the workshop. It is important to consider the context for the development of the Antarctic Array both with respect to international cooperation and for coordination with other scientific initiatives both within and marginal to Antarctica. Portable broadband seismic array deployments along the coastal area around Syowa Station by the Japanese Antarctic Research Expedition (JARE) will contribute to the above international Antarctic Array.

要旨: 平成 15 年 3 月 3 日~3 月 5 日にボルダー（アメリカ）において開催された「南極プレートの構造と進化に関する国際ワークショップ」(Structure and Evolution of the Antarctic Plate 2003; SEAP2003)に参加した。南極大陸を中心とした南極プレート内部の構造と進化過程に関する地震学的研究を進めていく上で、国際協力を踏まえた今後 10 年間の重点的な研究テーマや観測手法について様々な討論を行った。アメリカを中心にヨーロッパやオセアニア、アジア等、計 9 カ国から計 97 名の参加があった。南極内陸部での科学的研究の柱として、可搬型広帯域地震計によるアレイ観測 (Antarctic Array) が挙げられた。Antarctic Array は、1) 大陸全体規模での定常観測ネットワーク (Continental Network) の構築、2) 地域的規模での「刈り取り的」アレイ観測 (Regional Leapfrogging Arrays)、3) 目的を絞った 3 次元のアレイ観測 (3-D Array) から構成される。現在、宗谷海岸を中心に行っている広帯域地震計アレイをはじめとして、今後も国際状況の経過を見守りつつ積極的に観測協力に取り組みたいと考える。

¹ 国立極地研究所。National Institute of Polar Research, Kaga 1-chome, Itabashi-ku, Tokyo 173-8515.

² 東京大学地震研究所。Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, Yayoi 1-chome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0032.

1. はじめに

平成 15 年 3 月 3 日~3 月 5 日にボルダー（アメリカ）にて「南極プレートの構造と進化に関する国際ワークショップ (Structure and Evolution of the Antarctic Plate 2003; SEAP2003)」が開催され、これに参加した。

本ワークショップでは、南極大陸を中心とした南極プレート内部の現在の構造と進化過程に関する地震学的研究を進めていく上で、国際協力を踏まえた今後 10 年間の重点的な研究テーマや観測手法について様々な討論を行った。アメリカの地震学研究者を中心に、ヨーロッパやオセアニア、日本等からも幅広く参加し（計 97 名）、まさに南極地震学の国際ワークショップと呼ぶにふさわしいものであった。日本からは著者の 3 名が参加した。表 1 に、国別（すべて南極科学委員会 (Scientific Committee on Antarctic Research; 以下 SCAR) に加盟）の参加者数を示す。

表 1 国別の参加者数一覧
Table 1. Number of participants from each country.

国名	参加人数	国名	参加人数
アメリカ	76	アルゼンチン	1
イギリス	5	ニュージーランド	3
フランス	4	オーストラリア	2
イタリア	1	日本	3
ポーランド	2	合計	97

本ワークショップの主催者はコロラド大学の M. Ritzwoller であり、近年南極プレート全体の表面波トモグラフィーによる研究を進めている (Ritzwoller *et al.*, 2001, 等)。また本ワークショップの開催のために、アメリカ科学財団 (National Scientific Foundation; 以下 NSF) から多大な支援を受けており、さらに SCAR およびその下部組織である ANTEC ワーキンググループ (Antarctic Neotectonics Group) からも積極的な支持を受けている。デンバー郊外のボルダー市内にある Hotel Boulderado を会場として、3 日間の缶詰状態で懇意な会合を持つことができ、コロラド大学スタッフの献身的な運営で滞りなく進められた。

2. 概 要

口頭発表のプログラムの概要（セッション名のみ記載）を表 2 に示す。また、表 3 には本文中に記載した主な発表者とその所属を示す。なお、発表タイトル等の詳細は、URL (<http://ciei.colorado.edu/seap2003/>) に掲載されている。

初日の午前中は様々な方面から南極大陸での地震学研究的将来展望について提言がなされた。また地震学の主な研究テーマである地球内部構造の観点から、‘Earth Structure: Crust to Core’ セッションを中心に、地球表層部から地球中心核に至るまでのこれまでの研究成果の

表 2 プログラムの概要 (セッション名のみ記載)

Table 2. Outline of the workshop program.

[March 03]
Introduction and Welcome
The Big Picture
Anomalies Using Seismic Methods
Earth Structure; Crust to Core
Contact with Icesheet Dynamics/Climate Rebound
First Working Group Meeting
First International Collaboration Working Group Meeting
[March 04]
Volcanos and Earthquakes
Marine Geophysics/Margins
Previous Seismic Experiments around Antarctica
Synergistic Methods
Model Programs
Second Working Group Meeting
Second International Collaboration Working Group Meeting
[March 05]
Logistics and Operations
Reports from Working Group Chairs
Closing Remarks

レビューがあった。また午後の ‘Contact with Icesheet and Dynamics/Climate Rebound’ 等では、南極氷床や気候変動とリソスフェアの構造・ダイナミクスとの関連が議論された。

2 日目は、午前中に ‘Volcanoes and Earthquakes’ と ‘Marine Geophysics/Margins’ のセッションが行われ、地震学に関係する様々な学際的な研究紹介と今後の計画への提言があった。午後は、南極大陸でのこれまでの地震観測について関係各国から発表があり、続いて今後の観測技術の展望についてのセッション (‘Synergistic Methods’) が行われた。また初日と 2 日目の最後には、テーマ毎にワーキンググループ討論 (5 章に詳細を記載) 及び国際協力 (6 章に詳細を記載) について、十分な時間をとって意見交換が行われた。

3 日目は設営的な問題点についての共通理解を議論した後に、全体の場でそれまでの各ワーキンググループの討論結果の紹介と意見交換を行った。午後は Organizing Committee とワーキンググループの進行メンバーが集まり、計画について詳細な詰めが行われた。

3. 主 旨

初日、M. Ritzwoller が開催の挨拶を行った。今後 10 年間の南極大陸での国際協力による地震学研究分野の科学的調査研究の柱としての、可搬型広帯域地震計によるアレイ観測計画 (以下 Antarctic Array または広帯域アレイ観測と略記) を検討することが、本ワークショップの主旨であることを端的に述べた。Antarctic Array の具体的な内訳は、1) 大陸全体スケールでの定常観測ネットワークの構築 (Continental Network)、2) 地域的スケールでの「刈り

表 3 本文中に記載された発表者と所属一覧. アメリカ以外は国名を記載
 Table 3. Name and affiliation for participants who are named in the main text.

Name	Affiliation
S. Anandakrishnan	Pennsylvania State University
R. Aster	New Mexico Institute of Mining and Technology
S. Bannister	Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand
R. Bell	Columbia University
S. Borg	National Science Foundation
R. Butler	The Incorporated Research Institutions for Seismology
S. Das	University of Oxford
I. Dalziel	University of Texas at Austin
C. Finn	United States Geological Survey
D. Forsyth	Brown University
J. Fowler	The Incorporated Research Institutions for Seismology
M. Kanao	National Institute of Polar Research, Japan
B. Kennett	Australian National University, Australia
R. Kobayashi	University of Tokyo, Japan
R. Larter	British Antarctic Survey, United Kingdom
J. Leveque	Institute de Physique du Globe at Strasbourg, France
R. Livermore	British Antarctic Survey, United Kingdom
C. Meertens	The University NAVstar Consortium
J. Montagner	Institut de Physique du Globe at Paris, France
A. Nyblade	Pennsylvania State University
A. Reading	Australian National University, Australia
M. Ritzwoller	University of Colorado at Boulder
N. Shapiro	University of Colorado at Boulder
K. Shibuya	National Institute of Polar Research, Japan
X. Song	University of Illinois at Urbana-Champaign
T. Stern	Victoria University of Wellington, New Zealand
J. Stock	California Institute of Technology
M. Studinger	Columbia University
J. Wahr	University of Colorado at Boulder
D. Wiens	Washington University
T. Wilson	Ohio State University
M. Wyession	Washington University

取りの」アレイ観測 (Regional Leapfrogging Arrays), さらに 3) 目的を絞った 3 次元のアレイ観測 (3-D Array) である.

1) については, 昭和基地を含む既存の国際デジタル地震観測網 (Federation of Digital Seismological Network; 以下 FDSN) に属する南極の観測点は, 南極点アムンゼン基地 (SPA) を除いて全て海岸に位置しており, 表面波等で得られる地球内部構造の空間的な解像度が大陸内陸部で劣る傾向にあった. これを改善するため, 氷床ドーム域をはじめ内陸に地震定常観測点を設けることが提案された.

2) では, 大陸全体を 10 数箇所の領域に区切り, 各領域において地震臨時観測点を数 10 km 間隔で氷床上に面的に 10–20 点程度設け約 1 年間程度の観測をして, 1) よりもさらに空間分

解能の高いデータを得ることを目的とする。領域の区切り方は、南極点を中心に約 30 度刻みの扇型の案が有力であり、10 年程度かけて「刈り取り的」に観測領域を移動させて全体をカバーするデータを得るという、大変壮大な計画である。これまでもオーストラリア大陸では、SKIPPY 計画により類似した観測が成功しており (Van der Hilst *et al.*, 1994), またアメリカ合衆国内全域においても現在の観測点網よりもさらに密に臨時観測点が展開されている (EARTHSCOPE 計画) ことが、今回の Antarctic Array の背景にある。

3) については、旧 SPA 点から数キロ離れた場所に新しい QSPA 点が設置され、そこを起点に大中小 3 つの六角形アレイを展開し、全て氷床下約 300 m のボアホール内に地震計を設置する。最大アレイの基線長は 100 km であり、内核や核-マントル境界 (Core Mantle Boundary; CMB) 等の地球深部構造の研究が主な目的である。4.3 節に詳細を記載した。

上記以外にも、科学的目標をさらに絞ったプロジェクト的な観測 (Program Oriented Experiment) として、4) IRIS (The Incorporated Research Institutions for Seismology) の機材を利用した広帯域地震計の臨時観測、及び 5) 人工震源を利用した構造調査 (Active Source) が挙げられる。4) については、例えば南極横断山脈から南極点にかけての 1400 km 長の測線上に約 70 km 間隔で 10 数台の臨時観測点を設けることで、南極横断山脈直下のリソスフェアの構造を調べる試みが、最近開始されている (The Transantarctic Mountains Seismic Experiment; TAMSEIS 計画)。5) については、例えばボストーク湖の直下の地殻構造を調べるための探査がこれまでも行われているが、さらに詳細な構造を得るために意欲的な計画がなされている。

4. 経 過

4.1. 初 日

初日の午前中には、まず地震学に関連する様々な研究方面から将来展望についての提言がなされた。はじめに ANTEC ワーキンググループの代表である T. Wilson から、これまでに関連した南極での研究プロジェクトの説明があった。ANTEC は 1995 年に開催された南極地学国際シンポジウム (International Symposium on Antarctic Earth Science; ISAES) で発足したが、これまでに数回ワークショップを開催して、南極リソスフェアに関する静的及び動的な構造、また南極氷床変動や気候変動との関係についての学際的な研究を進めてきた。T. Wilson は、これまでの ANTEC の成果と共に、新たな研究テーマについて提言を行った。

次の 'The Big Picture' セッションでは、地質学的な考察から Gondwana 超大陸形成および分裂過程と現在の構造との関連 (I. Dalziel), 上部マントルの温度構造についての地震学的考察 (組成や非弾性の効果等, A. Nyblade), 南極横断山脈をはじめとするグローバルに分布する山脈の上昇過程についての考察 (T. Stern), さらに大陸内部での高品質な地震データ取得のための技術的な開発指針 (S. Anandakrishnan) など、南極における地震学研究進展のため

の総合的な講演があった。

また、地震学の主要な研究テーマである地球内部構造の観点から、‘Earth Structure: Crust to Core’ のセッションでは、地球表層部を占める地殻・リソスフェアから、地球中心核に至るまでのそれぞれの深さ毎に、これまでに得られてきた研究成果のレビュー講演がなされた。最初に、南極プレートの上部マントルにおける表面波解析の最近の進展についてレビューがあった (N. Shapiro)。将来の Antarctic Array 計画における 1) の Continental Network が実施され、現状の FDSN 点に加えて大陸内陸部に観測点が設けられると、得られる構造の内陸部での空間解像度が飛躍的に改善されることが示された。次に、南極周辺域の地震波異方性の特徴 (J. Montagner)、核・マントル境界 (CMB や D'' 層) 等の地球深部の不均質構造や異方性を南極のデータから見る利点についてのレビュー (M. Wyssession)、並びに内核の内部構造や差分回転 (マントル・地殻に対する相対的な回転運動: 例えば Song and Richards, 1996) 検出における Antarctic Array の重要性 (X. Song) などの講演があった。D'' 層や内核の異方性の研究は、近年昭和基地の地震データを用いても精力的に行われている (例えば, Isse and Nakanishi, 2001; 臼井ら, 2002)。

初日の午後には、‘Contact with Icesheet and Dynamics/Climate Rebound’ のセッションがあり、南極氷床や気候変動とリソスフェアの構造・ダイナミクスとの関連について発表があった。衛星重力の研究者である J. Wahr からは、氷床後退に伴うリソスフェアのアイソスタシー・リバウンドのシミュレーションビデオが上映された。

4.2. 2 日目

2 日目の最初は、‘Volcanoes and Earthquakes’ と ‘Marine Geophysics/Margins’ のセッションが行われ、地震学に関係する様々な方面の研究紹介と今後の計画への提言があった。‘Volcanoes and Earthquakes’ では、1998 年のバレー諸島付近で発生した巨大地震の原因についての、プレート内部の応力場による考察 (S. Das)、またマクマード・バンダ基地付近での臨時地震観測網より得られた局所地震及び氷震の震源分布や発震機構 (S. Bannister)、並びに南極プレート周辺の広範囲に渡る新生代のアルカリ・マグマ活動について (C. Finn)、それぞれ話題提供があった。‘Marine Geophysics/Margins’ では、大陸縁辺部の地震探査で得られた南太平洋縁辺部の進化過程 (R. Larter)、またゴンドワナ大陸分裂による南極大陸縁辺部の構造形成過程 (J. Stock)、さらにドレーク海峡やスコチア海周辺部での海洋プレートの進化過程について (R. Livermore) など、それぞれ海洋のテクトニクス研究の専門家による考察があった。

‘Previous Seismic Experiments’ のセッションでは、J. Leveque により、ドーム C 基地で越冬定常地震観測を開始した旨の発表があった。氷床表面下 12 m までシェルターを掘削して STS-2 型広帯域地震計と短周期地震計を設置した。J. Leveque によると過去 10 年来の計画ら

しいが、氷床の流動の影響の補正等、大陸氷床上での連続観測の維持はやはり難しいという印象を受けた。また、ボストーク湖直下の地殻構造が広帯域アレイデータのレシーバー関数解析により求められ (M. Studinger), 過去の衝突の影響で形成されたと推定される構造が現在のボストーク湖下付近に存在することが示された。さらに南極横断山脈付近での航空機 (ツインオッター) を利用した広帯域アレイ観測 (TAMSEIS 計画) の詳細が D. Wiens により説明された。南極点にかけて、1400 km 長の測線上に約 70 km 間隔で 10 数台の地震計による臨時観測点を設け、南極横断山脈直下のリソスフェアの構造と山脈の上昇機構を主に調べるためである。観測システムは、CMG-3 型地震計を用いて ARGOS システムによりマクマード基地にデータ伝送する。最後に R. Aster により、エレバス火山での最新の観測状況について説明があった。

‘Synergistic Methods’ のセッションでは、最初に K. Shibuya により日本南極地域観測隊 (Japanese Antarctic Research Expedition; 以下 JARE) における地学研究の紹介と地震計の開発についての発表があり、人工地震実験やペネトレーターについて質問があった。次に A. Reading から、東南極の沿岸に位置するオーストラリア諸基地付近に、ヘリコプターにより展開した広帯域地震計臨時観測について発表があった。午後には、南極大陸での地震以外の様々な地球物理的観測 (GPS, エアボーンレーダー, 重力, 電気伝導度など) による調査結果と展望についていくつか紹介があった。講演最後の ‘Model Programs’ セッションでは、アメリカ国内全域での EARTHSCOPE 計画を補うものとして、北アメリカ大陸の沿岸海洋底に地震計を臨時設置するという計画 (Ocean Mantle Dynamics) の紹介があった (D. Forsyth)。また B. Kennett から、3 章の主旨で述べた「刈り取り的」広帯域アレイ観測 (SKIPPY 計画) の詳細について紹介があり、将来において南極大陸で同様なアレイ観測を行うためのモデルプランについて説明があった。南極点を中心に 30 度毎に区切った扇型の領域間を、同一の機材を用いて「刈り取り的」に移動観測した場合には、表面波トモグラフィー等に十分なデータを得るためには全体として 10 年程度の観測期間をとる必要が示された。

4.3. 3 日目

3 日目は、これまでのまとめとして各ワーキンググループの討論結果の紹介・意見交換を主に行った (5 章に詳細を記載する)。国際地球観測年 (International Geophysical Year; IGY) の 50 周年としての国際極年 (International Polar Year; IPY) が 2007 年に予定されており、これを記念して同時期に大きな観測を行ってはどうか、という提案もあった (R. Bell)。‘Logistics and Operations’ では、R. Butler より南極点基地 (SPA) に最近設置された新しい地震アレイ観測網について紹介があった。老朽化した南極点基地 (SPA) にかわって、新しい観測点 (QSPA) を設置し、そこを起点に大・中・小 3 つの六角形アレイを展開する計画で、それぞれのアレイの基線は 100, 30 及び 10 km である。この六角形アレイ観測網は、主に内核や

CMB等の地球深部構造を得るためのものであり、とりあえず QSPA 点の水床下約 300 m 深にボアホール型地震計が設置された。今後 5 年計画で大・中・小の全アレイを完成させる予定である。上記の地球深部構造をさらに詳細に調べるため、かなり密な間隔での三次元アレイ (Cryo-Seismic Three-dimensional Array Lattice; CRYSTAL) も計画されている。これはボアホール式ジンバル型の三成分広帯域地震計数十個を、約 100 m 間隔で最大約 2750 m 深に三次元的な蜂の巣形状に設置するという、大変大掛かりなものである。地球を覗く望遠鏡としての CRYSTAL が完成すれば南半球では 3 箇所目 (既存の 2 箇所はオーストラリア) となる。その後、Antarctic Array 計画の今後の予算獲得に向けて、NSF から支援基準についての説明 (S. Borg) 並びに UNAVCO (The University NAVstar Consortium, the University Corporation for Atmospheric Research) からの支援活動について、説明があった (C. Meertens)。

5. グループ討論

初日と 2 日目それぞれの夕方に、以下の 4 つのワーキンググループに分かれ詳細な観測計画の意見交換を行った。グループ分けは、Antarctic Array 計画で分類 (3 章) された 1), 2) の目的のために一つ (‘Continental Network/Leapfrogging Array(s)’), 4), 5) のために一つ (‘Interdisciplinary Process-Oriented Experiments’), および ‘Technical Challenges’ と ‘Icesheet Dynamics/Climate’ の計 4 つである。我が国からは、R. Kobayashi が 1), 2) に、M. Kanao が 4), 5) に、K. Shibuya が ‘Technical Challenges’ にそれぞれ分かれて、両日とも同じグループに参加した。

5.1. Continental Network/Leapfrogging Array(s)

R. Kobayashi の参加した ‘Continental Network/Leapfrogging Array(s)’ のワーキンググループ (約 20 名) では、B. Kennett が進行役を務めた。ここでは主にグローバル地震学の立場から既設の FDSN 観測点を補うためのバックボーン観測網、サブバックボーン観測網、及び可搬型地震計観測の 3 つについて話し合われた。なお前者 2 つを合わせて、ここでは ‘Continental Network’ と呼ぶ。

まず、バックボーン観測網の強化のために常時観測点を増やすことが議論された。すでに昭和基地などに高水準のデータ品質を持つ広帯域地震計観測点が配置され FDSN に登録されている。しかし、現在の FDSN 観測点は SPA を除けば全て沿岸に位置しており、また西南極では南極半島にしかない。これらと同レベルのデータ品質を持つ定常観測点を、約 2000 km 間隔で均一な配置となるように、東南極内陸部に 2 点程度、また西南極に 3 点程度追加したい、という意向である。東南極の内陸部では、既存の観測基地であるポストーク基地やドームふじ観測拠点等が候補として挙げられた。また実際に今回の会合では、J. Leveque によりドーム C で広帯域地震計の定常観測を開始した旨の発表があった。次に、サブバック

ボーン観測網は、上記のバックボーン観測網をさらに補完するのを目的とし、1000–2000 km 間隔になるような地震計の配置が議論された。このサブバックボーン観測網展開のために、既存の GPS 観測点や観光施設などを利用する案が出された。サブバックボーン観測網は、バックボーン観測網ほど高水準の観測点は想定していないが、もし実現すれば観測点分布は大幅に改善されると期待できる。

さらに、可搬型地震計観測については、一定期間にある区域に集中して地震観測を行い、場所を移して観測することを繰り返すことで大陸全域を網羅しようという別の計画 (Leapfrogging Array(s)) が議論された。「Maximum coverage with minimum time (短期間に広範囲を)」というのがそのコンセプトである。ここでは具体的に、南極大陸を円形に見立てて扇状に 16 等分し、そのうちの複数のセクターを同時に 1 年間程度観測をして、6 年程度で全領域を観測するという案が出された (pinwheel array と呼ぶ)。観測点の設置には飛行機の使用が示唆されたが、複数の領域で同時に観測ができれば全体の観測期間を短縮することが可能である。しかし、そのためにはより多くの機材と設置展開のための大規模な設営的サポートが必須である。また内陸での連続観測を行うためには、これまで沿岸域で使用してきた IRIS より共用に供される広帯域地震計及び収録装置を使用することを想定しており、極低温での観測のための動作改良が必要である。オーストラリアの SKIPPY 計画で成功した手法が、南極においてそのまま適用できるかは疑問が残るが、将来挑戦する価値のある計画であろう。

5.2. Interdisciplinary Process-Oriented Experiments

M. Kanao の参加した ‘Interdisciplinary Process-Oriented Experiments’ 4), 5) のワーキンググループ (25 名程度) では、A. Nyblade の進行で様々な地震学的ターゲットについて意見交換を行った。A. Nyblade は、これまでタンザニアやケニア等で IRIS/PASSCAL (The Program for the Array Seismic Studies of the Continental Lithosphere) の機材により広帯域アレイ観測による研究を行ってきた実績があり (例えば, Nyblade and Langston, 2003), 南極大陸への展開にも関心を示している。初日は地震学的な目標として、南極大陸単独の研究から、よりグローバルな研究への発展・関連性を持つことに重点を置いて様々なテーマを出し合った。すなわち、地質構造や大陸の形状といった基本的テーマのみならず、気候や氷床変動、氷床下湖環境との関連性等、雪氷学・気象学・測地学研究との学際的連携の発展性を視野に入れるという意味である。また、西南極・南極横断山脈・ビクトリアランドを中心とした地域のリフトシステムや火山活動、マグマ活動、地震活動等からのアプローチも意見として検討されたが、地球上の他の大陸地域では検知できない南極域に特有の地球科学的な特徴を研究することの重要性が強く指摘された。さらに地球深部構造の観点から、内核の構造を得るための南極という地球上の位置の優位性について、X. Song 等より意見があった。

2 日目は数名のキーパーソンによる観測計画の提案という形式で行われた。R. Bell からは、現在ホットな話題の場所であるボストーク湖直下の構造（基盤及び浅部地殻）を得るために、湖を横断する測線で広帯域アレイ観測や人工地震・MT 探査を行うという提案があった。先の TAMSEIS を行っている D. Wiens からは、東南極の先カンブリア地塊（クラトン）縁辺部、特に南極横断山脈の地殻の厚さとテクトニクスの特徴、並びにそれを支えるダイナミックなマントル構造についての知見を得るという提案があった。手法としては上記と同様に広帯域アレイや人工震源を利用する。一方、リフト帯に隣接しているにも係わらず高い標高を持つ南極横断山脈の原因についても議論され、西南極と比較して厚い地殻を持つ東南極大陸の端部に位置する効果（‘Edge Effect’）が指摘された。また、T. Stern からは、ロス棚水域での地震波速度異方性についての集中的な観測計画が提案された。最終的には、進行役の A. Nyblade が表としてまとめ、西南極を中心に広帯域アレイを基本にした受動震源の観測を進めることを全体の場に提案することになった。

5.3. Technical Challenges

K. Shibuya は ‘Technical Challenges’ のグループに参加した。6-10 人の小グループだったが、S. Anandakrishnan ら、無人観測技術に深く関係している者ばかりであった。進行役は J. Fowler である。2 日間の集中討議で、無人観測技術の主要要素である電源とテレメータについて、現状のレビューを行い、ワーキンググループとしての勧告案をまとめた。

電源についての現状認識は以下の通りである。5-10 W の常時負荷を通年保証するものはまだない。太陽光発電は 4 月~8 月の稼動を保証せず、高地部では弱風なので、風力発電機の信頼性が低い。低電圧下でのバッテリー能力低下については、NiCd（ニッケルカドミウム）の新型電池に期待が持てる。負荷となるテレメータ装置についての現状認識は以下の通りである。3 kbps での常時通信が可能なテレメータはまだ実現していない。高地部では能動型指向性無線機のメリットが少ない。最大の問題は通信コストかもしれない。装置の動作環境としては、最低気温 -80°C 、年平均気温 -50°C への対応、また地震計以外のセンサーとして GPS や気象センサーへの対応、耐静電特性と悪いアース条件を考慮する必要がある。

その後、AGO（Antarctic Geophysical Observatory）の例、ブラック島での Northern Power 社の試み、ARGOS システムを利用した機器状態（State-of-Health）の監視、などについて検討が加えられたが、どれも満足できるものとは言いがたく、結局、以下の 10 項目が提言としてまとめられた。

- 1) まず、夏期間 100% の信頼性を持つシステムの実現を目指すべきである。冬期間データが得られなくとも、春になってシステムが起動するなら善しとすべきである。
- 2) リアルタイム通信を目指すか、サイトでダウンロードするかは、個々の観測点の目的と費用の折り合いで決めるべきで、一律ではない。

- 3) 航空機でのデータ回収に関する費用対効果を調査すべきである。
- 4) 現場での **event-detection** はテレメータデータに限る方が良い。
- 5) 低温特性 (-80°C) に十分考慮しなければならない。
- 6) ツインオッター機で輸送、設置できるサイズと重量でなければならない。
- 7) 試作した無人観測装置は実際の設置前に、アラスカやマクマード基地、南極点基地でテストすべきである。
- 8) 野外観測キャンプが設営された場合、地震/GPS 観測を積極的に行い、無人技術開発としての評価を行うべきである。
- 9) 無人技術開発に関して、設置・運用・保守を行う専用施設が必要である。
- 10) 特別な技術的挑戦のために、MRI (Major Research Instrumentation) へ応募し、資金獲得に努めるべきである。

6. 国際協力

初日と2日目それぞれのセッション最後に、国際協力についての全体での討論が **A. Reading** の進行で行われた。実際にはアメリカ以外の国の研究者が、今回提案されている **Antarctic Array** 計画に対してどのような協力関係を持つか、ということについての意見交換の場であった。南極全体を地域別に分類し、観測基地を設けている関係各国の地震学的観測研究についての現状確認を行った。東南極については、現在まで越冬定常観測点を設けている各国（オーストラリアやフランス、ロシア、ドイツ、中国等、もちろん我が国も）が中心になり、今後も研究協力体制を進める必要が再認識された。

Antarctic Array 観測計画全般への我が国の対応方針としては、以下のような連携が可能と思われる。

1) **Continental Network**: 昭和基地に関しては、これまで通りに定常観測を継続し、**FDSN** にデータを提供する。内陸の定常点の増設に関しては、ドームふじ観測拠点候補として考えられるが、第VI期5か年計画における雪氷グループの深層掘削計画の終了後に観測拠点をを使用した越冬定常観測は他観測分野でも検討されていないため、冬期間に極低温になる内陸域に定常点を設けることは設営的にも観測技術的にも非常に困難であると思われる。

2) **Regional Leapfrogging Arrays**: 西エンダービーランドを中心とした我が国の南極観測の関連地域においては、アメリカの航空機を利用した臨時観測点の設置に対して、設営的サポートの可能な範囲内で協力できるであろう。しかし将来的には、我が国の技術力で内陸での臨時無人装置を本格的に開発し、エンダービーランドを中心に観測点を展開できれば、1)、2) に対して十分な貢献が可能であると考えられる。

3) **SPA** での3次元アレイ観測: これについては、かつてカリフォルニア大学から国立極地研究所地学グループに共同研究の打診があったものであるが、現段階ですでに **IRIS** によ

り実際の観測が開始され、年次計画もすでに確定されているため、今後積極的な観測協力を行う必要は特にないと思われる。

4) **IRIS/PASSCAL Deployment**: 我が国やオーストラリア、ロシアやドイツ等、東南極を主な調査地域としている国からの参加者が少なかったこともあるが、今回参加した多くの研究者がターゲットとする地域は、西南極や南極横断山脈、ウィルクスランドのポストーク湖付近といった地域が多い。現在宗谷海岸を中心に **JARE** でモニタリング観測を行っている広帯域アレイ観測 (**GARNET** 連携; Negishi *et al.*, 2000; Kanao *et al.*, 2002) は、局所的・地域的なリソフフェアの構造のみならず、グローバルスケールでの構造や地球深部構造をも目的としている。観測点間の空間スケール (約 15 km) や研究目的からいえば、この 4) に近いと言えるが、短期間でのプロジェクト観測ではなく定常観測によりデータを蓄積しているため、1), 2), 3) にもさらに貢献可能であろう。

5) **Active Source**: これは受動的な遠地震解析ではなく、人工震源による主に地殻内部の構造探査が主であり、**JARE** での **SEAL** (**Structure and Evolution of the East Antarctic Lithosphere**) 計画による人工地震探査が貢献可能であろう。

7. おわりに

本ワークショップに参加して、今後 10 年間の南極大陸内での地震観測研究の展望について、諸外国の研究者間で十分な意見交換ができたと言える。**Antarctic Array** 計画については、2003 年夏までに全体計画を科学的目的をベースに素案を作成し、今回議論した検討事項に基づいて観測技術的・設営的な検討を重ねる。2005 年に再度ワークショップを開催して最終的な計画を決定して **NSF** に提出する予定となっている。今後も全体の経過を見守りつつ、我が国が協力できることがらに関しては積極的に取り組んでいきたいと考える。

今回の渡航費用として澁谷と金尾はコロラド大学より、また小林は日本極地研究振興会より、それぞれ支援を頂いた。記して関係者の皆様に感謝申し上げる。

文 献

- Isse, T. and Nakanishi, I. (2001): Inner-core anisotropy beneath Australia and differential rotation. *Geophys. J. Int.*, **151**, 255–263.
- Kanao, M., Kubo, A., Shibutani, T., Negishi, H. and Tono, Y. (2002): Crustal structure around the Antarctic margin by teleseismic receiver function analyses. *Antarctica at the Close of a Millennium*, ed. by J.A. Gamble *et al.* Wellington, The Royal Society of New Zealand, 485–491 (*R. Soc. N.Z. Bull.*, **35**).
- Negishi, H., Kanao, M., Kubo, A. and Tono, Y. (2000): Portable broadband seismic observations in the Lützow-Holm Bay region, East Antarctica. *AGU Spring 2000 Meeting S51A-06*, Washington, USA.
- Nyblade, A.A. and Langston, C.A. (2003): Broadband seismic experiments probe the east African rift. *EOS Trans., AGU*, **83**, 405–408.
- Ritzwoller, M.H., Shapino, N.M., Levshin, A.L. and Leahy, G.M. (2001): Crustal and upper mantle structure beneath Antarctica and surrounding oceans. *J. Geophys. Res.*, **106**, 30645–30670.
- Song, X. and Richards, P.G. (1996): Seismological evidence for differential rotation of the Earth's inner core.

Nature, 382, 221–224.

臼井佑介・平松良浩・古本宗充・金尾政紀 (2002): 南極昭和基地のデータを用いた最下部マントルにおける S 波速度異方性について. 第 22 回南極地学シンポジウムプログラム・講演要旨. 東京, 国立極地研究所, 15.

Van der Hilst, R.D., Kennett, B.L.N., Christie, D. and Grant, J. (1994): Project SKIPPY explores the mantle and lithosphere beneath Australia. *EOS Trans., AGU*, **75**, 180–181.